

具有蜂窝内壁的遮光罩杂散光抑制特性分析

陈 学 孙 创 夏 新 林

(哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 将具有蜂窝内壁结构的遮光罩内的杂散光传播分解为蜂窝结构的散射、内壁等效面传播两个层次的行为。通过建立蜂窝结构的等效面各向异性反射模型,采用蒙特卡罗法模拟获得内壁等效面的双向反射分布函数(BRDF)。以此为基础,再次采用蒙特卡罗法模拟遮光罩内壁等效面的杂散光传播过程,分析了该类遮光罩的杂散光抑制特性,并讨论了蜂窝高度和涂层反射率的影响。结果表明,遮光罩内壁蜂窝结构有很好的杂散光抑制作用;蜂窝高度与边长之比 $\delta \geq 1$ 时,遮光罩的抑制能力不再变化,降低涂层反射率能够有效地增强抑制效果。

关键词 空间光学;杂散光;遮光罩;蜂窝结构;蒙特卡罗法

中图分类号 TN214 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201232.0523004

Stray Light Suppression Property of Baffle with Honeycombed Wall

Chen Xue Sun Chuang Xia Xinlin

(School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract Stray light propagation in the baffle with honeycombed wall is divided into two levels, the scattering inside honeycomb structures and the transmission by the equivalent surface of inner wall. An anisotropic reflection model is established to predict the bidirectional reflectance distribution function (BRDF) data of the surface. By simulating the stray light propagation with the Monte-Carlo method, the suppression property of the baffle and the effects of coating reflectivity and geometric parameter of honeycomb are investigated. The results show that the baffle with honeycombed wall has a good performance of stray light suppression, and lower reflectivity of coating can enhance the performance.

Key words space optics; stray light; baffle; honeycomb structure; Monte-Carlo method

OCIS codes 350.6090; 120.4820; 290.2648; 290.1483

1 引 言

杂散光的产生严重影响了空间光学系统的性能^[1]。遮光罩是抑制系统视场外杂散光的主要手段,内壁一般设置挡光环结构,关于这类遮光罩的设计^[2,3]、优化^[4,5]、改进及性能分析^[6~9]已经有了大量的研究。采用微小蜂窝结构代替挡光环的抑制措施已经得到应用^[10],在遮光罩内壁形成大量的“光陷”孔穴,有利于杂散光的消除。然而,针对这类遮光罩的抑制特性还缺乏较深入的研究。遮光罩的杂光分析常采用有限元法专用程序^[11]和蒙特卡罗法的相

关软件^[6,7,11,12][包括高级系统分析程序(ASAP)、LightTools和TracePro等]。蒙特卡罗法的优势在于能够适应复杂结构的计算模拟,并考虑光线多次散射和部件的遮挡效应;而有限元法需对结构进行区域或面元划分,并预先确定光线传输主要路径以减少计算量,考虑多次散射和应用于复杂结构时计算量很大。

蜂窝结构的采用导致遮光罩内壁结构更加复杂,杂散光分析时难以直接进行光线追迹。而借助等效面的处理方式^[13],将其等效为漫反射面或采用理论

收稿日期: 2011-11-17; 收到修改稿日期: 2011-12-28

基金项目: 国家自然科学基金(90816022)资助课题。

作者简介: 陈 学(1985—),男,博士研究生,主要从事红外仿真与杂散光分析等方面的研究。

E-mail: hit_chenxue@163.com

导师简介: 夏新林(1966—),男,博士,教授,主要从事杂散光、红外辐射和耦合传热等方面的研究。

E-mail: xiaxl@hit.edu.cn(通信联系人)

的散射[即双向散射分布函数(BSDF)]模型^[10]均存在偏差。本文采用蒙特卡罗法,首先分析蜂窝结构的反射特性,建立其双向反射分布函数(BRDF)数据库,并对遮光罩内壁等效面进行反射特性建模,进一步模拟分析其抑制特性;从性能优化的角度出发,讨论蜂窝结构高度和表面涂层反射率的影响。

2 蜂窝内壁等效面反射模型

将蜂窝结构的顶面看作等效面,建立其反射特性模型。首先对蜂窝结构的反射特性进行研究,如图1所示,蜂窝单元为具有一定壁厚的正六棱柱,内表面和顶面壁均喷涂消光涂层。采用蒙特卡罗法直接模拟蜂窝结构的杂散光传播,建立等效面的BRDF数据库。

蜂窝结构基本参数: $a=h=5\text{ mm}$, $b=0.5\text{ mm}$;涂层为 $\rho=0.07$ 的黑漆,漫反射。这里蜂窝结构参数的选取仅为研究其反射特性和遮光罩的抑制性能,实际遮光罩设计时需满足可靠性和轻量化要求,需进行结构优化设计^[14,15]。反射特性部分模拟结果如图2、3所示, θ_i 、 φ_i 、 θ_r 、 φ_r 分别表示光线入射、反射方向的天顶角和圆周角。可以看出,蜂窝结构等效面的BRDF呈各向异性,且具有很强的后向散射特征;即说明等效面采用漫反射或理论散射模型会产生较大误差。等效反射率约为0.033,光线的入射圆周角对反射特性影响很小,本文采用圆周角 30° 、不同天顶角入射时的结果建立遮光罩内壁等效面反射特性概率模型。

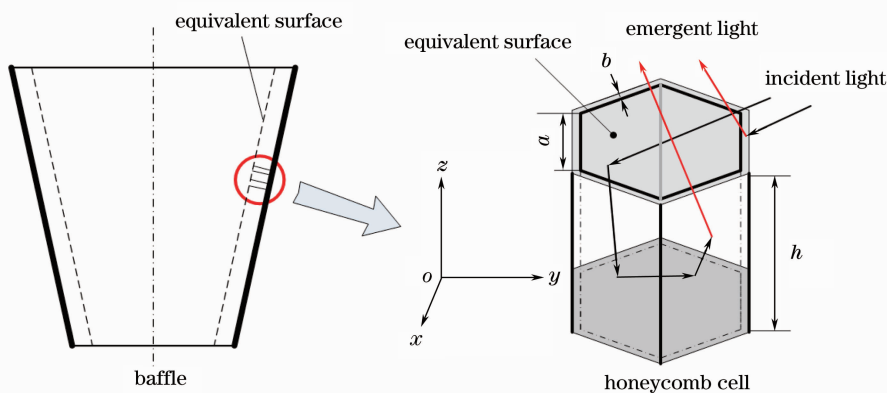


图1 蜂窝单元

Fig. 1 Honeycomb cell

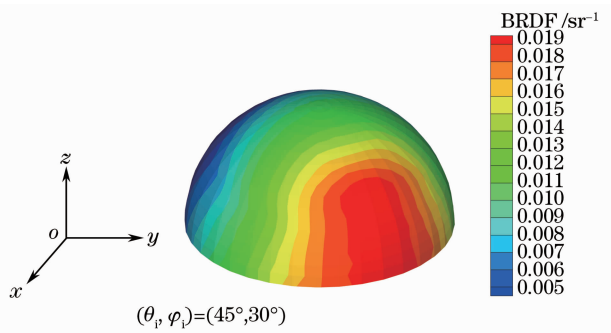


图2 BRDF空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of BRDF

蒙特卡罗法是一种概率模拟方法,求解核心是建立与物理过程相对应的概率模型。经推导,各向异性反射方向的空间分布概率模型为

$$R_\varphi = \frac{\int_0^{\pi/2} \int_0^\varphi f_{\text{BRDF}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \sin \theta_r \cos \theta_r d\theta_r d\varphi_r}{\int_0^{\pi/2} \int_0^{22\pi} f_{\text{BRDF}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \sin \theta_r \cos \theta_r d\theta_r d\varphi_r}, \quad (1)$$

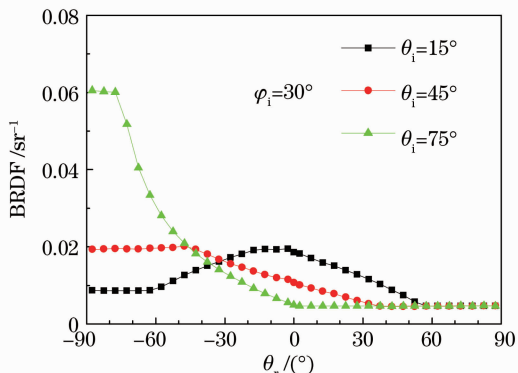


图3 入射平面的BRDF分布

Fig. 3 Distribution of BRDF on the incident plane

$$R_\theta = \frac{\int_0^\theta f_{\text{BRDF}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \sin \theta_r \cos \theta_r d\theta_r}{\int_0^{\pi/2} f_{\text{BRDF}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) \sin \theta_r \cos \theta_r d\theta_r}, \quad (2)$$

式中 $f_{\text{BRDF}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ 为表面的BRDF, R_θ 、 R_φ 分别为反射方向天顶角和圆周角的随机分布数, θ 、 φ

分别为所求反射方向的天顶角和圆周角,(2)式中 φ 的数值由(1)式求得。可见,若已知表面BRDF,杂散光传输模拟时可通过随机数的产生和判断求得入射光线的反射方向。

3 遮光罩抑制特性

3.1 抑制机理

从杂散光的传输特性分析遮光罩内壁的几种处

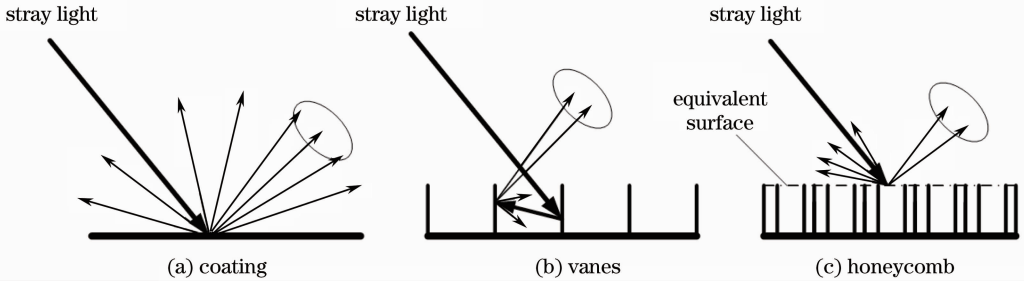


图 4 遮光罩内壁的散射特性
Fig. 4 Scattering of baffle inner wall

3.2 计算实例

蜂窝结构取上述参数,遮光罩设计参数为:视场角 $\omega=10^\circ$,太阳光抑制角 $\alpha=30^\circ$,入瞳直径 $D=100$ mm。基于遮光罩的设计原则,分别设计一级和二级遮光罩,如图 5 所示。外形尺寸如表 1 所示,二级遮光罩按总长度最小进行设计^[4]。可见,二级遮光罩的轴向和径向尺寸都较大。

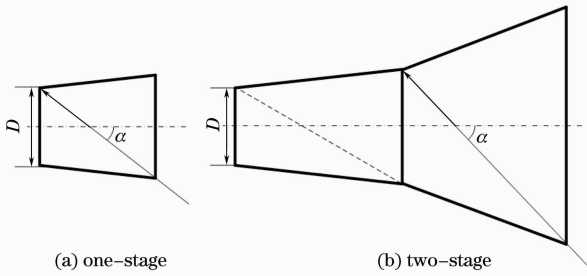


图 5 遮光罩示意图
Fig. 5 Schematic diagram of baffles

表 1 遮光罩的外形尺寸
Table 1 Overall dimensions of baffles

Baffle	Entrance diameter /mm	Length /mm
1	135.72	204.14
2	636.79	1108.23

蒙特卡罗法求解光线传输过程的基本理论和方法参看文献[12,16],文献[12]对方法的可靠性已经进行了验证。本文分别模拟了杂散光平行入射和漫入射时遮光罩的抑制能力,消光比 η 为

理方式,可知其抑制的理论依据。如图 4 所示,消杂光涂层本质上是降低表面的 BRDF 数值,减小杂散光散射成分的能量。挡光环主要依靠对杂散光的多次散射和吸收;但一般情况下需设置的数目较多,光线的散射方向具有不确定性,挡光环边缘还会产生较为严重的衍射效应,从而导致消光效果变得不是很理想^[6]。蜂窝结构则因低反射率和很强的后向散射而能够很好地抑制杂散光。

$$\eta = \frac{\phi_1}{\phi_0}, \quad (3)$$

式中 ϕ_0 为遮光罩入口处的杂散光能量; ϕ_1 为遮光罩出口处接收到的杂散光能量。

从图 6 和表 2 可以看出,杂散光平行入射时,遮光罩 1、2 的消光比分别在 10^{-4} 和 10^{-9} 量级;漫入射时,分别在 10^{-2} 和 10^{-3} 量级。可见,二级遮光罩的抑制效果明显优于一级遮光罩;但由于尺寸较大,使用往往会受到系统尺寸和外部条件的限制,需综合考虑系统整体布局和性能要求等因素。表 3 为到达遮光罩底面杂散光的详细信息。平行入射时,遮光罩 1 主要是一次散射,而遮光罩 2 主要为二次散射;漫入射时,两者都是直接照射所占份额很大,即遮光罩内壁对杂散光的消除所起作用很小。

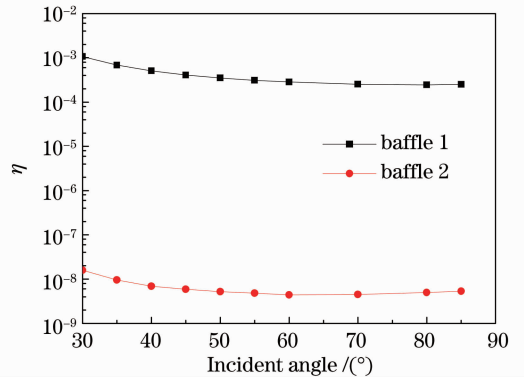


图 6 不同角度平行入射时遮光罩的抑制能力
Fig. 6 Stray light suppression capacity for parallel incidence light with different incident angles

表 2 漫入射时遮光罩的消光比

Table 2 Extinction ratios with diffuse incidence

Extinction ratio	Baffle 1	Baffle 2
η	5.207×10^{-2}	1.032×10^{-3}

表 3 各散射次数所占比例 / %

Table 3 Ratios of different scattering orders / %

Scattered light	Parallel incidence at 45°		Diffuse incidence	
	Baffle 1	Baffle 2	Baffle 1	Baffle 2
0th order	0	0	98.9	99.5808
1st order	95.22	0	1.053	0.397
2nd order	4.62	90.39	0.046	0.0216
3rd and higher order	0.16	9.61	0.001	0.0006

4 影响因素

遮光罩的性能优化,是在抑制视场外杂散光与符合总体尺寸要求的前提下,进一步提高遮光罩的抑制水平。一般从几何外形、结构尺寸、涂层特性以及挡光环的结构形式和设置等方面着手。内壁为蜂窝结构的遮光罩可从涂层特性和蜂窝结构尺寸出发,本文以遮光罩 1 结构作为分析模型,讨论涂层反射率和蜂窝结构高度对遮光罩抑制特性的影响。

4.1 涂层反射率

采用上述基本参数,涂层反射率取为 0.13。由图 7 和表 4 可知,杂散光平行入射时,涂层反射率对遮光罩抑制性能的影响较大,消光比增大 1 倍多;而对漫入射时的抑制性能影响很小,这是由于漫入射时杂散光主要是直接照射到达,若涂层反射率继续增大,则内壁的反射增强,遮光罩的性能定会下降。因此,采用低反射的消光涂层能有效增强该类遮光罩的抑制性能。

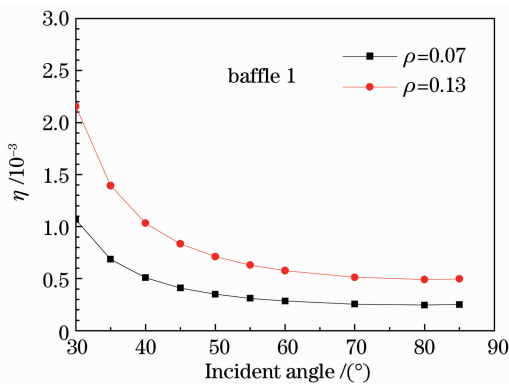


图 7 涂层反射率对消光比的影响

Fig. 7 Effects of ρ on extinction ratios

表 4 不同涂层反射率下漫入射时遮光罩的消光比

Table 4 Extinction ratios of baffle with diffuse incidence

for different ρ	
ρ	Extinction ratio
0.07	5.207×10^{-2}
0.13	5.266×10^{-2}

4.2 蜂窝结构高度

取蜂窝单元的高度与边长之比 $\delta=h/a$ 分别为 0.6、1、2。如图 8 与表 5 所示,蜂窝结构高度增加,杂散光平行入射时,遮光罩的抑制性能稍有增强,但当 $\delta \geq 1$ 时仅存在较小差异;而对漫入射时的抑制水平几乎没有影响,这是由于直接照射到达遮光罩底面的杂散光所占比例很大,导致蜂窝结构的作用不能完全体现。可见,蜂窝结构的高度增加到一定程度后,遮光罩的性能几乎不再变化,采用单元参数 $\delta=1$ 就能取得良好的消光效果。

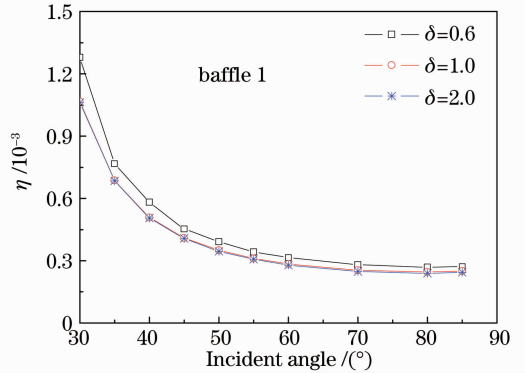


图 8 蜂窝结构高度对消光比的影响

Fig. 8 Effects of δ on extinction ratios

表 5 不同的蜂窝结构高度下漫入射时遮光罩的消光比

Table 5 Extinction ratios of baffle with diffuse incidence for different δ

Extinction ratio	$\delta=0.6$	$\delta=1$	$\delta=2$
η	5.213×10^{-2}	5.207×10^{-2}	5.207×10^{-2}

5 结 论

对于内壁为蜂窝结构的遮光罩,当直接采用光线追迹难以实现杂散光分析时,采用等效面的处理方法,根据蜂窝结构的反射特性,建立遮光罩内壁等效面的反射特性概率模型,计算分析遮光罩的抑制特性。由于蜂窝结构的低反射和后向散射特征,遮光罩对杂散光能够产生很好的抑制效果。通过模拟分析,得出如下结论:

1) 通过建立内壁等效面反射概率模型,能够有效地对具有蜂窝内壁的遮光罩的杂散光抑制性能进

行评估。

2) 杂散光平行入射时, 具有蜂窝抑制结构的一级和二级遮光罩消光比可分别达到 10^{-4} 和 10^{-9} 量级; 杂散光漫入射时, 两种遮光罩的消光比分别在 10^{-2} 和 10^{-3} 量级。

3) 蜂窝结构的几何参数和涂层反射特性对其杂散光抑制能力有重要影响。当蜂窝结构高边比 $\delta < 1$ 时, 遮光罩抑制能力随 δ 增大而增强, $\delta \geq 1$ 时, 抑制能力变化不明显; 降低涂层反射率能够进一步提高遮光罩的抑制水平。

参 考 文 献

- 1 Niu Jinxing, Zhou Renkui, Liu Zhaohui *et al.*. Analysis of stray light caused by thermal radiation of infrared detection system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(8): 2267~2271
牛金星, 周仁魁, 刘朝晖 等. 红外探测系统自身热辐射杂散光分析[J]. *光学学报*, 2010, **30**(8): 2267~2271
- 2 Jean-Jacques Arnoux. Star sensor baffle optimization: some helpful practical design rules[C]. *SPIE*, 1996, **2864**: 333~338
- 3 Huang Zhiqiang, Xing Tingwen. Principle and realization of baffle and vane's programmable design[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(4): 119~123
黄智强, 邢廷文. 遮光罩和挡光环程序化设计的原理及实现[J]. *光电工程*, 2006, **33**(4): 119~123
- 4 Li Hui, Li Yingcai. An optimum design method for the light shade of spaceborne optical system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1996, **25**(10): 914~918
李 晖, 李英才. 星载光学系统遮光罩消杂光结构优化设计方法[J]. *光子学报*, 1996, **25**(10): 914~918
- 5 Liao Zhibo, Fu Ruimin, Zong Xiaoying. Optimal designing of baffle of star sensor[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4): 987~990
廖志波, 伏瑞敏, 宗肖颖. 星敏传感器遮光罩的优化设计[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4): 987~990
- 6 Du Baolin, Li Lin, Huang Yifan *et al.*. Optimum design and analysis of vane in satellite remote sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(s2): 233~236
杜保林, 李 林, 黄一帆 等. 星载传感器的挡光环优化设计与分
- 析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(s2): 233~236
- 7 Yang Lihua, Fan Xuewu, Yu Shunjing *et al.*. Design of a new-style vane[J]. *J. Applied Optics*, 2010, **31**(1): 29~33
杨利华, 樊学武, 余舜京 等. 一种新型挡光环的设计[J]. *应用光学*, 2010, **31**(1): 29~33
- 8 Mei Chao, Zhou Sizhong, Ma Ming *et al.*. A new method of baffle design[J]. *Procedia Engng.*, 2011, **15**: 4516~4520
- 9 Li Yun, Xiang Libin, Li Libo. Design and simulation of the baffle of a new type space camera [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2010, **37**(7): 41~44
李 芸, 相里斌, 李立波. 一种新型空间相机遮光罩的设计与仿真[J]. *光电工程*, 2010, **37**(7): 41~44
- 10 Li Xiaoping, Sha Shengchun, Hu Tingliang. Suppression of stray light for long focal length off-axis three-mirror optical system[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(11): 2063~2068
李晓平, 沙晟春, 胡亭亮. 长焦距离轴三反光学系统杂散光的抑制[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(11): 2063~2068
- 11 Yuan Yukai. Stray light suppressing measure of optical system [J]. *J. Atmospheric and Environment Optics*, 2007, **2**(1): 6~10
原育凯. 光学系统杂散光的消除方法[J]. *大气与环境光学学报*, 2007, **2**(1): 6~10
- 12 Tan Heping, Shuai Yong, Xia Xinlin *et al.*. Reliability of stray light calculation code using the Monte Carlo method[J]. *Opt. Engng.*, 2005, **44**(2): 023001
- 13 Li Dexiong, Yan Dayuan. Equivalent reflectance of baffle with vanes[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(7): 777~780
李德熊, 阎达远. 具有挡光环的遮光筒的等效反射率[J]. *光学学报*, 1994, **14**(7): 777~780
- 14 Ding Fujian, Li Yingcai. The FEA of outer baffle and dynamics optimum design of baffle[J]. *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(1): 75~79
丁福建, 李英才. 外遮光罩工程分析及其结构动力优化[J]. *光子学报*, 1999, **28**(1): 75~79
- 15 Jia Xuezhi, Jin Guang, Zhang Lei. Design and optimization of lightweight outer baffle for space camera [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, **16**(8): 1560~1565
贾学志, 金光, 张 雷. 空间相机外遮光罩结构设计与优化[J]. *光学精密工程*, 2008, **16**(8): 1560~1565
- 16 Xia Xinlin, Shuai Yong, Tan Heping. Calculation techniques with Monte Carlo method in stray radiation evaluation[J]. *J. Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2005, **95**(1): 101~111

栏目编辑: 谢 婧